

電力と並ぶ二次エネルギーとしてのアンモニア燃料

青木一三

1. はじめに

エネルギー変換プロセスの基本設計を生業にしてきた者にとってはそのプロセス・プラントが、一国のエネルギー・システム、ひいては世界のエネルギー・システムの中で、長期間にわたり、堅実に作動し続けていることを目撃することは喜びである

担当した基本設計において先覚者のいない中でゼロから組み立てるといふ醍醐味を味わってしまった者にとっては、同じ充足感を求めて思弁する、という落とし穴にはまる。人類は自らの生存のためにどのようなエネルギー・システムを採用するのだろうか、とつい考えてしまう日々ということになりがちである。人々の選択基準は長期間にわたり、持続的に使え、安定的に稼働し、ローコストで、効率がよく、環境を破壊せず、安心でき、幸せをもたらすものであるだろう。

編集部から折角の機会が与えられた。人類がおのれの生存をかけてこれから選んでゆくエネルギー・システムがどのようなものになるかという思考実験の成果をここにご披露できるのは幸せである。

2. 二酸化炭素のグリーンハウス効果

本論に入る前に、二酸化炭素の温室効果について言及しなければならぬ。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）はサッチャー首相によって提案され、1988年、国連によって設立された二酸化炭素に起因する温暖化を予測する国際機関である。この予測に基づき1994年に気候変動枠組条約が発効し、1997年の京都で開催された第3回締約国会議（COP3）では京都プロトコル（議定書）が締結された。

IPCCがよりどころとする各国の予測モデルは1967年に真鍋淑郎が米国気象局大気大循環研究セクションで鉛直気温分布を予測した「鉛直1次元放射対流モデル」というコンピュータモデルに端を発する。いずれもこれを三次元に拡張したものである。¹⁾

ドイツのブラウンシュバイク工科大学、数理物理研究所のゲルハルト・ゲーリッヒらは2007年に「二酸化炭素の温室効果は間違い」という論文を発表した。²⁾ この論文によると、IPCCと傘下の研究機関はいまだに真鍋氏が開発した伝導を無視し、熱力学の法則に違反して対流圏上端から放射熱が地表にリサイクルして地表を暖めるといった間違ったモデルを採用し続けていると批判している。

二酸化炭素濃度が上がると対流圏上層の二酸化炭素層の厚みが増す。キルヒホッフ-プランク関数が教えるところによれば、地球の熱収支を維持するためにはこの上方に拡大した放射層の温度を維持しなければならない。真鍋のモデルは対流圏の鉛直方向熱移動の手段として放射と対流のみをモデル化している。したがって上方に厚みを増した放射層の温度を対流で維持するために大気全体の温度を温暖化しなければならなくなる。

実際の大气中には約1%の水蒸気と約0.04%の二酸化炭素、メタンなどのグレーガスがあ

る。これらグレーガス分子が地表からの地球放射を吸収すると、その熱を再放射する前に平均自由行程数10ナノメートルにある隣の窒素や酸素分子に運動エネルギーを伝える。熱を受けとり、軽くなった大気は対流で上空に吹き上がって熱を運ぶ。この対流を生じさせるに必要な温度差が大気の温室効果といわれるものである。J・T・ホートンによって1976年に書かれた教科書「大気物理学」によれば、伝導がグレーガスの放射より卓越するか否かは気圧によって決まり、グレーガス濃度の影響は受けない。³⁾

二酸化炭素濃度が高くなると対流圏上層の二酸化炭素放射層の厚みが増す。しかし窒素や酸素の量は変わらないから、その気圧は低いまま、ほとんど変わらない。ここでは放射が伝導より優勢のため、相互放射で放射層の温度を一定に保つことができる。したがって大気全体を温暖化させて対流で熱移動しなくてよいことになる。すなわち二酸化炭素濃度上昇による温暖化はないことになる。

放射高度にあるグレーガスが放射するとき、ほぼ半分は地表に向かうが、すぐ下層のグレーガスに捕捉され、伝導で透明ガスに伝わり、上空へとリサイクルする。したがって IPCC のように地表まで放射が到達して地表を温めることはないのである。この様子を図 1 に示した。

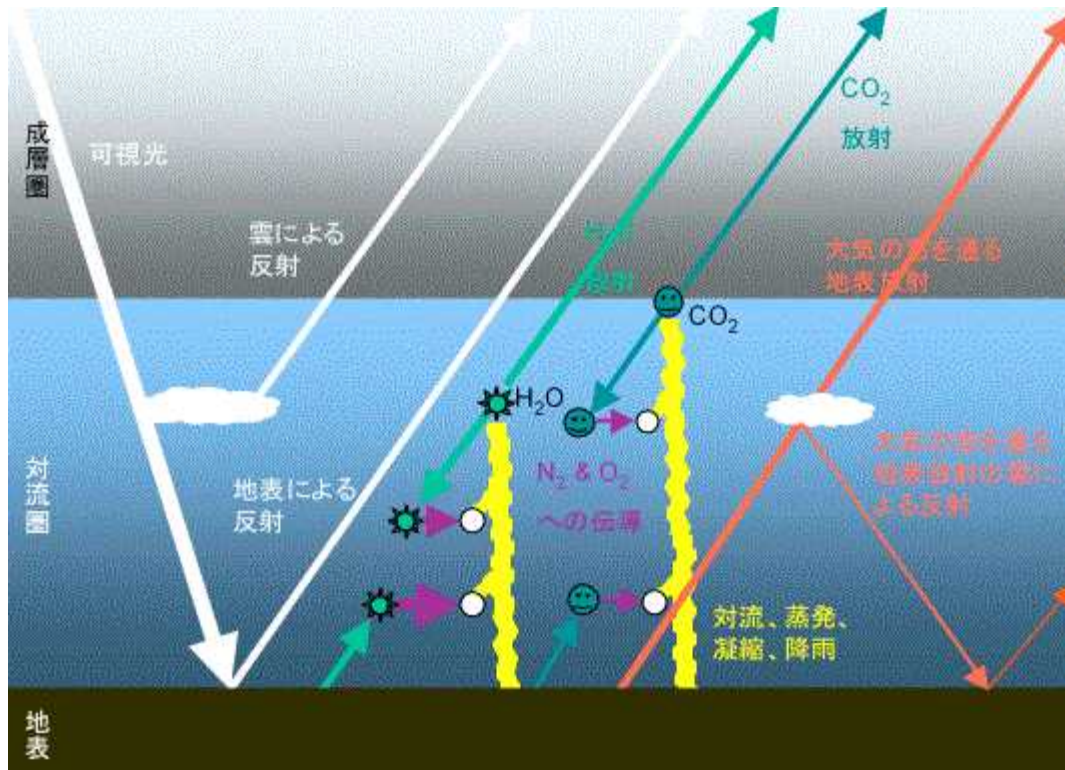


図 1 大気の熱収支図

IPCC の間違った予測が政治的理由で世界に流布してしまった結果、気象学者達の対応はガリレオの地動説がでた時のローマ法王庁の対応に似てきている。しかし科学というものは時間がかかるが事実が証明してくれる。すでに世界の過半数の人々が気候変動は自然

現象ではないかとうすうす感じ初めている。というわけで、いずれ世界は IPCC の予測は間違いと認識するだろう。そういう前提で以下の論を進めてみよう。

3. 一次エネルギーの世代交代予測法

過去 10 万年間、人類は人、牛、馬の力で土地を耕し、薪で料理し、暖をとってきた。100% 太陽の恵みを利用してきたのである。ところが技術の進歩で安価な石炭が生産され始めると伝統的な薪に次第にとって代わった。薪資源が枯渇したわけではない。岩石が枯渇したから石器時代が終わったのではない。資源量・埋蔵量と関係なく、技術革新により、競合するエネルギーコストの相対的变化と利便性によってエネルギーの世代交代が発生したのである。

1838 年にベルギーの数学者ピエール・ヴェルハルストによって考案された資源ないし効用が有限の時の成長曲線であるロジスティック曲線を F とすると S 字型になる。この F の微分 $dF/dt = f$ は釣鐘型になる。これが 1970 年にシエルの地質学者のはハバートがテキサス油田のピークアウトを予測したハバート曲線である。

国際応用システム解析研究所のマルケッティとナキシェノビッチが 1979 年に世界の一次エネルギーの世代交代を $\log(f/(1-f))$ という物流関数でうまく表現できることを示した。⁴⁾

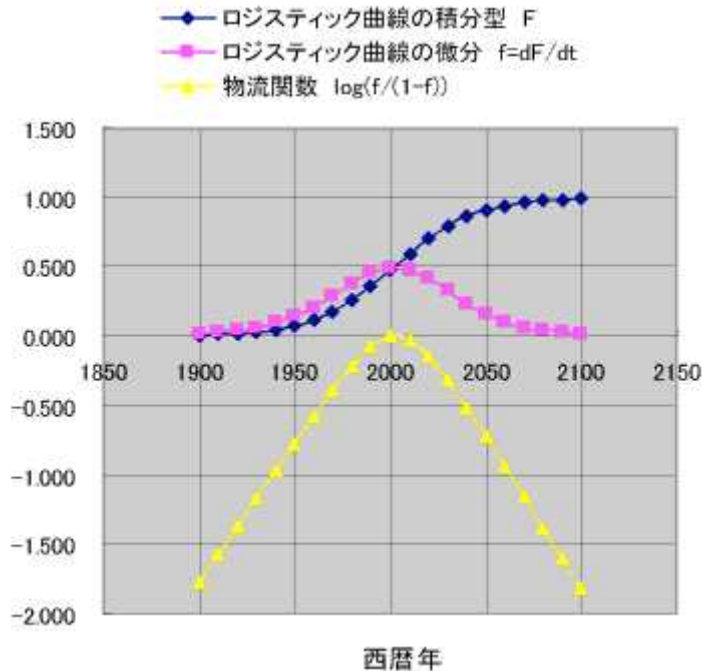


図 2 物流関数

物流関数の f は一次エネルギー市場の占拠率（シェア）であるとともにロジスティック曲線 F の微分値と相似という二重の意味を持つ。これをマルケッティ・ナキシェノビッチ・ダイヤグラムと呼ぼう。以上 3 つの関係を物流関数(図 2)に示した。

この曲線の意味するところは衰退期の勾配は成長期の勾配の符号を変えたものになると

いうもの。なぜなら複数の競合するエネルギーのシェア f の合計は 1 のため、あるエネルギーが競合に負けて衰退する速度は、勝ったほうの成長速度と符号を変えるだけで同じくなるためである。木炭と石炭の盛衰史がこれを証明している。

4. 改訂マルケッティ・ナキシェノビッチ・ダイヤグラム

化石燃料はながらく生物起源とされ、それゆえ有限とされるが、化石燃料の主要構成要素は炭素である。炭素はウランなど金属資源とおなじく宇宙の創世期に巨人星のなかで核融合により生成したものだ。従って地球の岩石のなかには膨大な炭素が含まれている。化石燃料とされるものはこの地球内部の炭素が圧力と熱と岩石の触媒作用で高分子に合成されたものがにじみでてトラップにつかまり、あるいは水和化合物として海底に溜まったものだ。⁵⁾ 化石燃料に含まれる生物マーカーとされるものも、無機的に合成されるということがわかっている。そういう意味で原始資源量は炭素にしてもウランにしても膨大である。しかし我々が資源として認識するものは経済的に手に入るものである。先にものべたように資源量・埋蔵量と関係なく、競合するエネルギーコストの相対的变化と利便性によってエネルギーの世代交代が発生する。こういう考えでマルケッティ・ナキシェノビッチ・ダイヤグラムの 1980 年以降を見直して改訂図(図 3)を作成した。

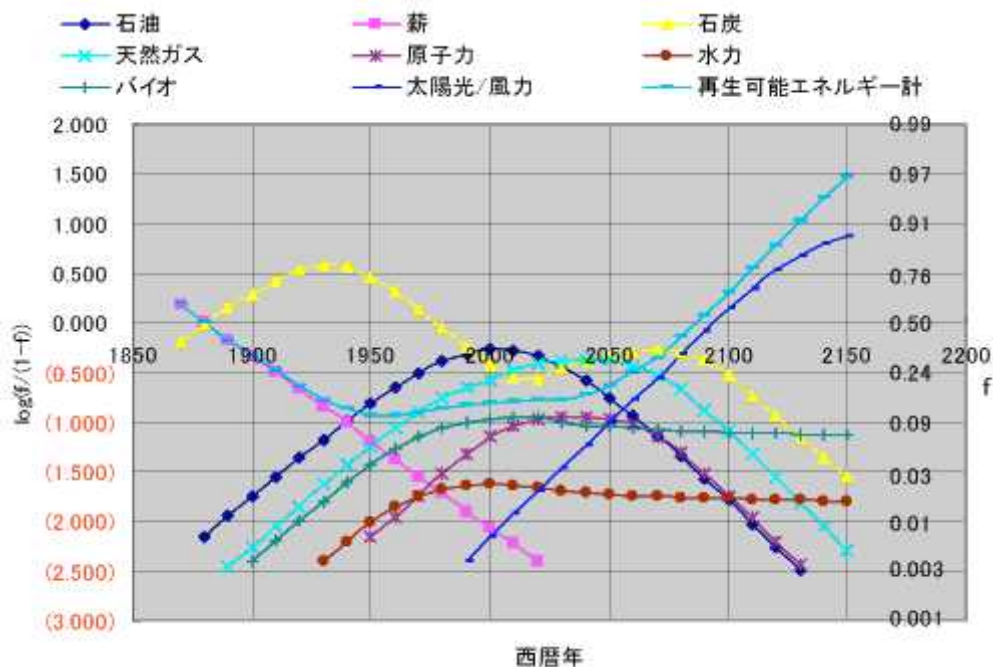


図 3 改訂マルケッティ・ナキシェノビッチ・ダイヤグラム

IEA のワールド・エネルギー・アウトルックを参考にして 2000 年の分率 f を石油 0.35、天然ガス 0.21、原子力 0.067、水力 0.023、バイオ 0.1、太陽光/風力 0.007、残りは石炭とした。勾配はナキシェノビッチ・ダイヤグラムと同じにした。それぞれのピークアウト時期は以下のように決めた。

(1)石油：1998年、サイエンティフィック・アメリカン誌にコリン・キャンベルとジョン・H・ラエール石油の究極可採埋蔵量を1.8兆バレルと見積もり、ハバート曲線から石油生産がピークを越える時期を2005年とした。⁶⁾

(2)天然ガス：2007年、モールとエバンスは在来型天然ガスの究極可採埋蔵量を346兆立方メートル、非在来型天然ガスについての究極可採埋蔵量を181兆立方メートルと推算してロジスティック曲線の微分形よりピークガスは2043年とした。⁷⁾最近では非在来型天然ガスは在来型天然ガスと同量するという見方もある。しかし、あればあるだけ使うのが人間の本性のため、ピークガスとなる時期は少し遅れる程度であろう。

(3)石炭：石炭の究極可採埋蔵量は化石燃料中で最大であるため、石炭が他のエネルギーの不足を埋める立場にある。以上のような理由で全てのエネルギーの合計 $\Sigma f_i=1$ となるように石炭のシェア・カーブを決めた。驚くことに石油と天然ガスのピークアウトを埋めるために、リバイバルし2ピークとなった。二酸化炭素の温室効果の危惧がないののだから、ガス化コンバインドサイクル発電、メタノールやジメチル・エーテル(DME)などの合成自動車燃料の原料として使われるであろう。

(4)原子力：ワンスルーのウラン資源の利用を前提に経済協力開発機構(OECD)の原子力機関は2050年にピークに軽水炉1,500基と3.4倍になるという予想を採用している。二酸化炭素が温室効果を持たないと判明すれば、大規模放射能汚染というブラック・スワンを抱える原子力をこれ以上採用するものはいないであろう。ウランの高速増殖炉は各国で研究中であるが、現在のような方式はこれからの人類が必要とする持続的利用が可能な増殖率を達成することは出来ないだろうと考えられる。トリウムの溶融塩炉はまだ構想段階である。核融合炉は技術的に成功しない夢物語となろう。

(7)再生可能エネルギー：ソーラーセル、集光型太陽熱発電(CSP)、風力、水力、バイオなどがこれに該当する。産業革命以前使われた薪は再生可能エネルギーの一つである。産業革命によってこの薪から化石燃料である石炭への世代交代が生じた。有限な化石燃料やウランを使い尽くせば、人類は新しい技術に支えられた再生可能エネルギーへの依存に再度切り替えざるを得ないだろう。こうして再生可能エネルギーはバスタブ曲線をえがいて産業革命前に復帰するのである。

ソーラーセル：再生可能エネルギーの内、最大の太陽放射は地球表面上に薄く降り注ぐ。しかしその量は膨大である。地球が太陽より受け取る放射エネルギーは 1.37kW/m^2 (太陽定数)である。地球の断面積 $127,400,000\text{km}^2$ をかけると地球全体が受け取っているエネルギーは $1.740 \times 10^{17}\text{W}$ となり、現在人類が消費しているエネルギーの1万倍もある。ほぼ無限のエネルギーといってもいい。

大気を通過して地表に達する太陽放射は 1kW/m^2 となる。変換率14%のソーラーセルを真南に向け仰角 35.3 度で固定設置し、気候ファクター40%、インバーター効率93%とすると年間発電電力は $144\text{kWh/m}^2 \text{ y}$ となる。日本の年間総発電量10,362億kWhを発電するには $7,196\text{km}^2$ (山手線内側面積の114倍)で十分である。日本の国土は 38万 km^2 であ

るから国土の1.8%にソーラーセルを設置すれば日本の電力の全部をまかなえることになる。

多量生産が本格化すれば発電単価は数年で市販電力と同等に下がり、グリッド・パリティーが達成される。資源的にはシリコンとガラスは無尽蔵にある。

集光型太陽熱発電 (CSP): 降雨量の少ない砂漠に適しており、トラフ型集光器の開発で相応の地位を占めると予想される。ソーラーセルとまとめて表示した。

風力: 風力はソーラーセル、CSPとまとめて表示した。

水力: 水力も開発し尽くされたと理解し、IEAの2000年の数値より生産は増えないとした。この場合、シェアは暫減する。

バイオ: 太陽エネルギーの農作物によるエネルギー転換率は1%以下である。IEAの2000年の数値より生産は増えないとした。水力と同じくシェアは暫減する。薪もバイオであるが分けて表示した。

5. エネルギー消費曲線

石油でもガスでも可採埋蔵量は価格が上がれば、生産量は増える。幸運にも2004年BP統計の可採埋蔵量の2倍は使えるとすると図3を適用し、図4のエネルギー消費曲線が描ける。⁹⁾

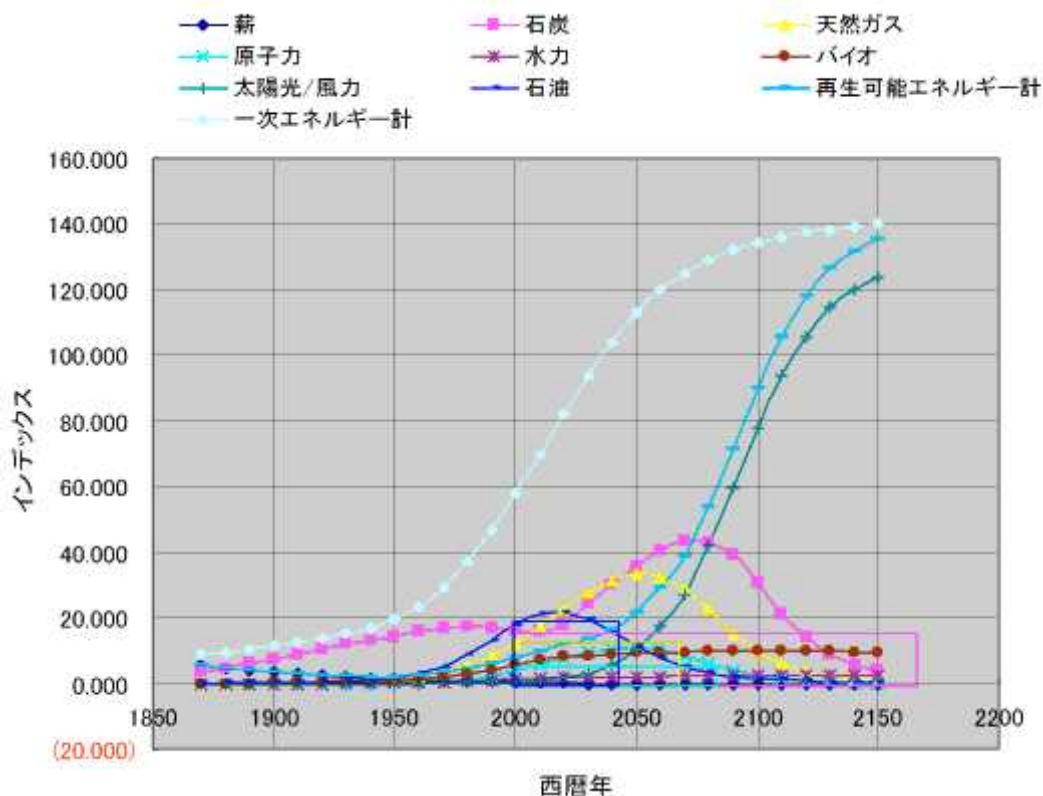


図4 エネルギー消費曲線

ここで長方形は化石燃料に関してはBP統計の可採年数(R/P比)、ウランに関してはIAEA統計の可採年数に相当する。

6. 二次エネルギーとしてのアンモニア

さて石油がピークアウトする遷移的時期を考えてみよう。この時期は自動車、船、航空機などの交通機関の燃料代が高騰し、文明を維持できなくなる。自動車は二次電池で駆動できる。しかしバッテリーは回収できるエネルギーが85%程度、寿命が1,000から3,000サイクルと短く、自動車としてもコスト高。船には高価すぎ、航空機には重すぎる。そこで天然ガスや石炭が残っているうちはメタノールやDMEのような合成燃料に変換してつかうことになるだろう。気候変動に与える影響はなくとも、海洋の酸性化による海洋生物への影響があるかもしれない。その時にはアンモニア燃料に転換すればよいのだ。副生する二酸化炭素は回収・隔離する。一般社会において、アンモニアは肥料、DMEは溶剤という固定観念がある。しかしアンモニアはLPGと同じ液体燃料として使える。社会的に受容されているLPGタクシーと同じで、燃料を入れ替えるだけですぐ使える。違いはもれると臭いことだ。漏洩にすぐ気がつくため、かえって安全ともいえる。天然ガスから製造されているアンモニアの価格はエネルギー換算でガソリンと同程度なのである。LNGと同じく冷却して海上輸送されている。

ソーラーセルやCSPが普及しても昼しか発電できず、風力は変動が大きい。化石燃料が使える間は火力発電で需給バランスをとることになる。しかし化石燃料が使いなくなると、電力は保存がきかないため、夜間停電という事態になる。揚水発電は環境破壊を引き起こし、電力系統を二次電池でバックアップするコストは膨大となる。国境を越える系統連携も考えられるが、ソーラーセルやCSPの電力をアンモニアに変換して貯蔵・輸送し、夜間電力向けの火力燃料として使われるようになるであろう。無論メタノールやDMEのような炭素系合成燃料化も使えるが、化石燃料がピークアウトすれば炭素原料が得にくくなる。ならば空気中に80%ある窒素と水からアンモニアを合成して液体燃料にするのが、最も経済的である。

電力を電解で水素にしてから合成するという2段法は無駄である。一挙に電解しながら水素がプロトンでいるところを捕まえて窒素と反応させる電解合成法がよいだろう。溶融塩を電解質に使う京都大学法、1998年にテッサロニキにあるアリストテレス大学のゲオルグ・マルネロスらが発見したペロプスカイト型構造を持つプロトン伝導性酸化物セラミックス(PCC)を固体電解質とする方法などがある。⁹⁾ 後者は多孔質プラチナまたはパラジウム電極をアノードとし、これに水蒸気を供給し、カソードにニッケルまたは銅系の電極をおいて電気分解すると水からプロトンが外れてPCCを流れてカソードに至り、ここで電子を得てプロトンがふたたび水素に戻るとき、カソードにある窒素と反応してアンモニアが合成される。転換効率は83%である。

ちなみに電解水素を燃料にしようとする転換効率55%で、貯蔵に200気圧の高圧ボンベが必要となるし、圧縮動力も必要である。または液化する場合は液化用動力に23%割いて冷却液化しなければならず、コストがかかりすぎである。

このようなわけで再生可能エネルギーから変換したアンモニアは液体燃料であるから自動車、船、航空機の燃料にもなる。場合によっては製鉄、有機素材製造プロセスのエネルギー源としても使われるであろう。こうしてアンモニアは電力と並ぶ二次エネルギーとなるであろう。

このように石油がピークアウトしたあと、天然ガスや石炭から製造する合成燃料は炭素系のメタノールや DME ではなく、窒素系のアンモニア燃料であるべきということが分かる。そして将来の二重投資を避ける意味で当初からアンモニア燃料の流通網を整備することが重要と分かる。砂漠など太陽光豊かな地域での大量製造・大量貯蔵、海上輸送、そして消費端までの流通機構のシステム構築に数十年の時間がかかる。これは LNG ネットワークの構築ですですに経験したことである。巨大システムとなるから投資の方向を間違えると損失は大きい。

さて、いままで IPCC が間違っているという前提で論を進めたが、仮に IPCC が正しいとしてもアンモニアはカーボンフリー燃料だから困ることはない。どう転んでも本命となる可能性大ということはお分かりいただけたのではないかと思う。

7. あとがき

いま世界は二酸化炭素に温室効果があるという前提で動き出している。しかしもう一度、科学的真理はなにか見極めて仕切りなおすの必要がありそうだ。

「生き残る種というのは、最も強いものでもなければ、最も知的なものでもない。最も変化に適応できる種が生き残るのだ」...チャールズ・ダーウィン

参考文献

- 1) Manabe and Wetherald, "1D Radiative-Convective Model" (1967)
- 2) Gerhard Gerlich, et al "Falsification Of The Atmospheric CO2 Greenhouse Effects Within The Frame Of Physics " Atmospheric and Oceanic Physics 11 Sep 2007 version4.0 (2009)
- 3) John Theodore Houghton, "Physics of atmospheres" Cambridge University Press (1976)
- 4) Nebojsa Nakicenovic, "Energy Strategies for Mitigating Global Change" IIASA Jan. (1992)
- 5) Thomas Gold, "The deep earth gas hypothesis", Scientific American (2003)
- 6) Colin Cambell, Jean Laherrère, "End of Cheap Oil", Scientific American March 1st, (1998)
- 7) Mohr, SH and Evans, GM, "Model Proposed for World Conventional, Unconventional Gas", Oil and Gas Journal, vol. 105, no. 47, 17 December (2007), p. 46
- 8) BP Statistical Review of World Energy 2004 & 2008
- 9) Jason C. Ganley, Harvard University Department of Chemical Engineering "Solid State and Electrolytic Ammonia Production"
- 10) 「グローバル・ヒーティングの黙示録」 <http://www.asahi-net.or.jp/~pu4i-aok/biblodata/globalheating/globalheatingj.htm>